

АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МАГНИТНОГО РЕДУКТОРА.

Соколова Е.М., Мошинский Ю.А.

Соколова Е.М, НИУ (МЭИ), г. Москва, Россия, SokolovaYM @ mpei.ru

Мошинский Ю.А, НИУ (МЭИ), г. Москва, Россия, MoshchinckyYA@mpei.ru

Аннотация - Предлагается аналитический метод расчета магнитного редуктора с постоянными магнитами. При расчете используется метод наложения, согласно которому момент редуктора определяется как результат взаимодействия магнитного потока одной системы постоянных магнитов с распределенным током, который заменяет другую систему постоянных магнитов.

Ключевые слова - магнитный редуктор, электромагнитный момент.

Магнитные передачи, способные трансформировать значительные моменты подобно механическим коробкам передач с зубчатым зацеплением, в настоящее время являются объектом интереса [1–2]. Преимущества магнитных передач по сравнению с механическими являются, высокий передаваемый удельный момент более 10^5 нм/м³ и отсутствие физического контакта элементов, участвующих в передаче вращающего момента,

Конструкции с высокоэнергетическими магнитами, могут быть выполнены в виде многоступенчатых магнитных редукторов [2]. На “рис.1” представлен поперечный разрез конструкции одноступенчатого редуктора с постоянными магнитами (ПМ). Он имеет три основные части: наружный ротор, модулятор - ферромагнитное кольцо с ферромагнитными

участками (сегментами) и пазами, и внутренний ротор. На наружном роторе расположены ПМ, имеющие большое число пар полюсов $2p_1$, например, $2p_1=10$, он вращается с низкой скоростью. На внутреннем роторе также расположены магниты, но с меньшим числом пар полюсов, например $2p_2=4$. Он вращается с большей скоростью. Магнитное поле наружного ротора, взаимодействуя с неподвижными сегментами модулятора $Z=7$, создает ряд гармоник индукции в воздушном зазоре. Первая гармоника индукции будет иметь число полюсов $2p=4$ и взаимодействуя с полем ПМ внутреннего ротора, создает электромагнитный момент. Аналогично, за счет взаимодействия поля ПМ внешнего ротора с гармоникой с числом полюсов $2p=10$ создается момент, действующий на этот ротор.

Магнитный редуктор представляет сложное электромеханическое устройство, надёжная оценка функциональных свойств которого может быть получена в результате численного математического моделирования [2]. Для его реализации требуются основательные программные и временные ресурсы. Поэтому заслуживают внимания аналитические методы расчета, базирующиеся на традиционных подходах достаточно близких по конструкции электрических машин, например редукторных электродвигателей [3].

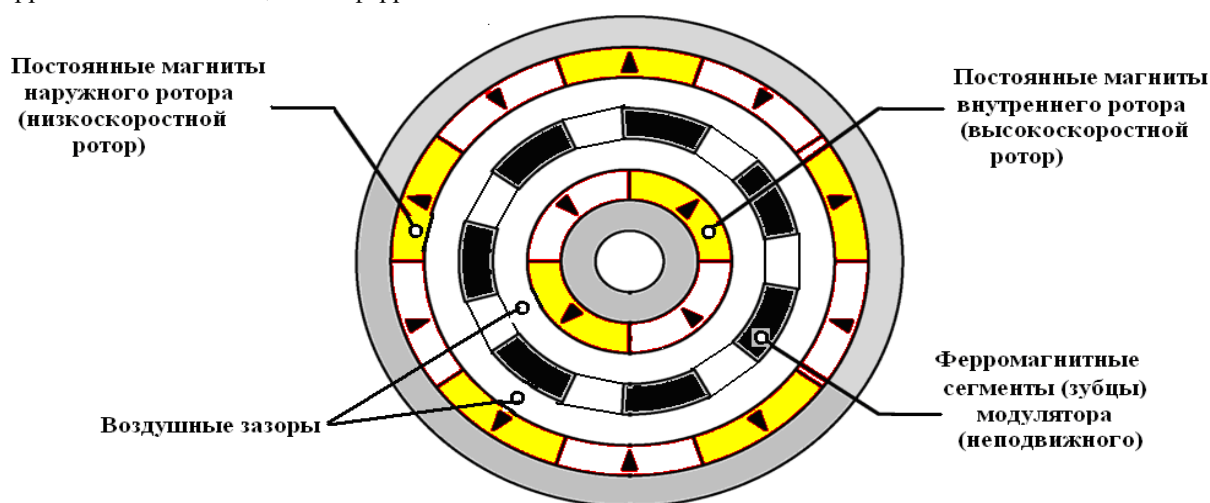


Рис.1. Поперечный разрез одноступенчатого цилиндрического редуктора.

Расчет магнитного поля в воздушном зазоре редукторных двигателей основан на использовании проводимости воздушного зазора $\lambda\delta$, которая учитывает только постоянную составляющую λ_0 и первую гармонику проводимости λ_1 [3]. Согласно этому методу индукция магнитного поля от основной гармоники МДС обмотки $F_1 = F_{m1} \sin(\pi/\tau * v * t - p * \alpha)$ представляет сумму трех полей: основной гармоники индукции магнитного поля

$B_{\delta 0} = F_{m1} * \sin(\frac{\pi}{\tau} * v * t - p * \alpha) * \Lambda_0$ и две гармоники с амплитудами,

$$B\delta_{1,2} = -F_{m1} / 2 * \Lambda_1 * \sin[\frac{\pi}{\tau} * v * t + (Z_1 \pm p) \alpha]$$

Как следует из этого выражения, односторонняя зубчатость зазора, вызывает дополнительные группы магнитных полей, которые имеют $(Z_1 \pm p)$ пар полюсов и угловую скорость вращения $\omega_z = \pm \omega / (Z_1 \pm p)$. Применим метод гармонических проводимостей воздушного зазора для расчета моментов магнитного редуктора. Расчет проводится при следующих допущениях: не учитываются краевые эффекты, магнитная проницаемость ферромагнитных участков равна магнитной проницаемости линейной зоны кривой $B(H)$.

Для определения электромагнитных моментов используем метод расчета, основанный на

разбиении активной зоны редуктора на ряд областей: 0-VI “рис.2”. Магнитная цепь магнитного редуктора включает следующие участки, соединенные последовательно: воздушные зазоры δ_1 и δ_2 , между модулятором и роторами, ферромагнитные сегменты (зубцы) модулятора - h_z , спинка наружного ротора - h_{a1} , спинка внутреннего ротора - h_{a2} . При расчете ПМ наружного и внутреннего роторов заменяются эквивалентными токовыми слоями с плотностями J_{m1} и J_{m2} .

На “рис.3,а” показана развёртка части редуктора с постоянными магнитами на внутреннем роторе. Постоянные магниты приняты прямоугольной формы с высотой h_m и длиной l_m в направлении оси z . На “рис.3,в” показано пространственное распределение напряженности постоянных магнитов $H_m(x)$ в сечении $a-a$ при работе ПМ в точке K “рис.3,б”. Для анализа удобно выразить $H_m(x)$ в виде ряда Фурье

$$H_m(x) = \sum_{v=1}^{\infty} H_{mv} \cos(k_v x) \quad (3)$$

где $k_v = v * \pi / \tau$, v -любое положительное число нечетное, $\tau = \pi / \tau$,

$$H_{mv} = \frac{4}{\pi} * \frac{1}{v} H_m \sin(v * \frac{b_m}{\tau} * \frac{\pi}{2})$$

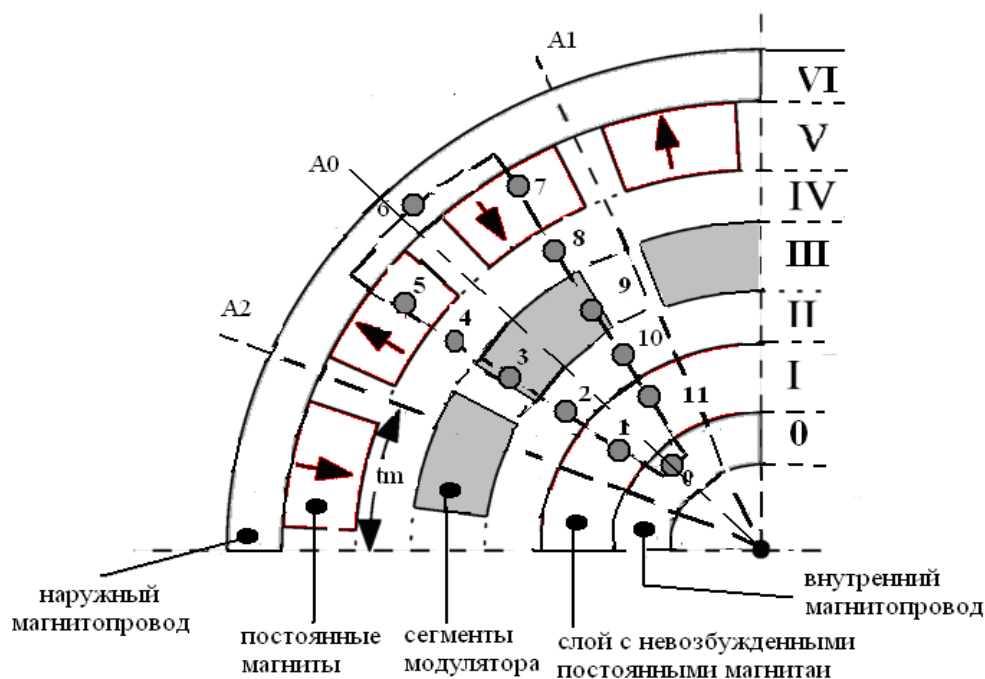


Рис. 2. К расчету магнитной цепи

Из уравнений Максвелла [4] эквивалентная плотность тока, направленного вдоль оси z равна

$$j_m(x) = \frac{d[H_m(x)]}{dx} = \sum_{v=1}^{\infty} J_{mv} \sin(k_v x) \quad (4)$$

$$J_{mv} = \frac{4}{\tau} H_m \sin(v * \frac{b_m}{\tau} * \frac{\pi}{2})$$

В общем случае поверхностная плотность и МДС постоянных магнитов на статоре смещены в пространстве. Взаимное положение плотности тока и поля магнитов определяют магнитную силу и момент редуктора

Для расчета индукций в различных участках редуктора, используем метод во многом схожий с методом расчета классических машин, основанный на использовании закона полного тока:

$$\sum_{i=1}^n H_i * l_i = H_m * h_m \quad (5)$$

и закона непрерывности магнитного потока при прохождении через различные участки магнитной цепи.

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_3 = \dots = \Phi_n \quad (6)$$

где n - число участков магнитной цепи, h_m - высота магнита, H_i - напряженность магнитного поля и l_i - длина i -го участка, H_m - напряженность постоянных магнитов.

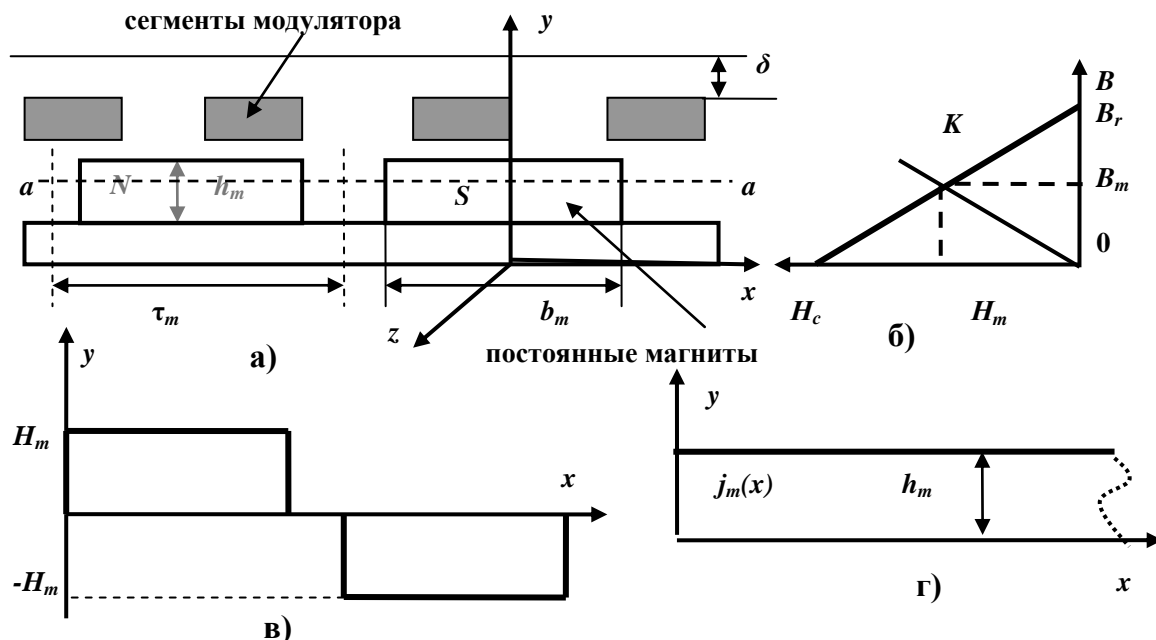


Рис. 3. Замена постоянных магнитов средой с эквивалентным током.

Поскольку для постоянных магнитов используются редкоземельные элементы, кривая размагничивания ПМ линейна “рис.3,б”. Поэтому для нее справедливо следующее уравнение: $H_m = H_c(1 - B_m/B_r)$;

Так как в конструкции редуктора используются ПМ с $\mu_r \approx 1$, то полагаем, что магнитная система машины является слабо насыщенной. Тогда распределение магнитного поля может быть получено на основе метода наложения решений, полученных отдельно при возбуждении со стороны наружного ротора (ПМ на внутреннем роторе отсутствуют, они заменены средой с μ_r) и при возбуждении со стороны внутреннего ротора (ПМ на наружном роторе отсутствуют).

При расчете магнитного поля от ПМ считаем, что магнитный поток в каждом слое сосредоточен в пространстве, ограниченном линиями A1-A0 и A0-A2, проходящими через полюсное деление, индукция на каждом участке распределена равномерно. Расчет магнитной цепи производится при обходе по контуру 0-1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-0, “рис.2”. Для каждого участка определяется площадь среднего поперечного сечения, средняя длина пути магнитного потока, магнитное напряжение этого участка.

Расчет магнитной цепи редуктора выполняется в следующей последовательности. Задаемся индукцией ПМ из диапазона $B_{m1(0)} = (0,3-0,5)B_r$. Определяем поток ПМ Φ_{m1} , по нему

индукции участков- $B_{a0}, B_{m1}, B_{\delta 1}, B_z, B_{\delta 2}, B_{a6}$, и затем находим соответствующие магнитные напряженности $H_{a0}, H_{m1}, H_{\delta 1}, H_z, H_{\delta 2}, H_{a6}$. По закону полного тока рассчитываем суммарную МДС цепи – МДС магнитов F_{m1} , напряженность H_{m1} и индукцию $B_{m1(1)}$ постоянных магнитов. Сравниваем значение индукции $B_{m1(0)}$, заданной в начале, с индукцией $B_{m1(1)}$, полученной в конце расчета, и в случае их расхождения повторяем расчет вновь до получения требуемой точности решения ϵ

$$(B_{m1(i)} - B_{m1(i+1)}) / B_{m1(i)}.$$

В результате определяются индукция B_{m2} в на участке -I с магнитной проницаемостью μ_r , и МДС постоянных магнитов F_{m1} на участке- V

Аналогично выполняются расчет магнитной цепи для варианта, когда ПМ расположены только на внутреннем роторе, а магниты наружного ротора заменены средой с проницаемостью μ_r . В результате вычислений определяются индукция B_{m1} на участке- V с μ_r и МДС F_{m2} на участке -I.

При определении индукций в воздушном зазоре следует учитывать эквивалентный воздушный зазор $\delta' = \kappa_\delta * \delta$, что соответствует проводимости воздушного зазора λ_0 . Электромагнитная сила F_{em} , обусловленная взаимодействием магнитного потока одной системы ПМ с распределенным эквивалентным током, который заменяет другую систему ПМ, может быть определена на основе формулы Био [4]:

$$F_{em} = \int_V [j * B] dv \quad (7)$$

где j - плотность тока внутри элемента объема, B -индукция внутри этого объема, создаваемая внешними по отношению к рассматриваемому элементу объема источниками поля, dv - элемент объема. Интегрирование ведется по всей поверхности, охватывающей тело. Учитывая, что индукция внешнего поля постоянна вдоль оси y , нормальна к оси x и описывается выражением $B_y(x) = B_{m1} * \cos(\pi * x / \tau)$, а поверхностная плотность тока и равна $J(x) = J_m * \sin[\pi / \tau (x - x')]$, после ряда преобразований формула силы “(7)” приводится к виду:

$$F_{em} = \{ C_f * J_m * B_{m1} \} \sin(\pi / \tau * x') \quad (8)$$

где $C_f = p * h_m * l_m * \tau$, p - число пар полюсов ПМ, l_m -длина ПМ в направлении оси z , τ -полюсное деление, $\pi / \tau * x'$ - сдвиг между волнами плотности тока и индукции, B_{m1} - амплитуда индукции первой гармоники, созданная магнитами наружного (или внутреннего) ротора на участке ПМ внутреннего (или наружного) ротора. Она рассчитывается по формуле

$$B_m = \frac{B_{m0} * \Lambda_1}{2 \Lambda_0} \quad (9)$$

где B_{m0} -индукция основного поля, созданного ПМ, которая находится из расчета магнитной цепи. Соотношение (9) следует из того, что индукции в воздушном зазоре при наличии сегментов модулятора равны

$$B_{\delta 0} = F_{m1} * \Lambda_0; B_{\delta 1} = F_{m1} * \Lambda_1 / 2 \quad (10)$$

Из “(10)” следует, что, если известны индукция от основного поля $B_{\delta 0}$ и проводимости воздушного зазора λ_0 и λ_1 , то тогда составляющая индукции в воздушном зазоре $B_{\delta 1}$ определяется как

$$B_{\delta 1} = \frac{B_{\delta 0} * \Lambda_1}{2 \Lambda_0} \quad (11)$$

Поскольку магнитная система редуктора слабо насыщена из-за больших воздушных зазоров, “(11)” можно использовать и для нахождения гармоник индукций участков- (I и V) при замене $B_{\delta 0}$ на B_{m0}

$$B_{m1} = \frac{B_{m0} * \Lambda_1}{2 \Lambda_0} \quad (12)$$

Расчет магнитных проводимостей Λ_0 и Λ_1 приведен в [5]. Электромагнитный момент определяется произведением силы на плечо

$$M_{em} = 0.5 * D_m * F_{em} \quad (13)$$

где D_m - диаметр ПМ наружного или внутреннего ротора. С учетом выражения для B_{m1} максимальный момент редуктора равен

$$M_{em} = C_f * B_{m1} * J_m * D_m * \frac{\Lambda_1}{4 \Lambda_0}$$

На основе представленной методики была составлена программа и рассчитаны электромагнитные моменты магнитного редуктора, основные конструктивные данные которого приведены в [2]. Результаты сравнения значений максимальных моментов, рассчитанных аналитическим и численным методами, представлены в “Таблице 1”.

Таблица 1.

Результаты расчета			
Ступени		I	II
M_m , нм	Числен метод	1.45	192
	Аналит. метод	1.62	168

Максимальное расхождение не превышает 11%.

ВЫВОДЫ.

1. Показано, что принцип действия магнитных редукторов подобен принципу действия редукторных двигателей, поэтому для их расчета можно использовать метод гармонических проводимостей, широко применяемый для исследования последних.
2. Получено выражение для определения электромагнитного момента редуктора на основе произведения распределенной плотности тока, заменяющей одну систему магнитов, и индукции другой системы ПМ.
3. Предложена упрощенная методика расчета магнитных цепей и максимальных моментов редуктора на основе принцип суперпозиции магнитных полей двух систем ПМ. Она позволяет на этапе предварительного проектирования при изменении основных размеров редуктора и характеристик ПМ определять моменты его ступеней и находить требуемые размеры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Huang Cheng -Chi, Tsai Mi- Ching, D.G. Dorrell, Lin Bor-Jeng. Development of Magnetic Planetary Gearbox // IEEE Transactions on magnetic. 2008. Vol. 44, № 3. P. 403 – 412.
2. Дергачёв П.А., Кирюхин В.П., Кулаев Ю.В. и др. Анализ двухступенчатого магнитного мультипликатора. – Электротехника, 2012, № 5, с. 39–46.
3. Каасик П. Ю. Тихоходные безредукторные микроэлектродвигатели. «Энергия», Ленинградское отделение, 1974, -136 с.
4. Иванов - Смоленский А.В. Электромагнитные силы и преобразование энергии в электрических машинах. – М.: Высшая школа, 1989, 312 с.
5. Геллер Б, Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. - М: «Энергия», 1981.-352 с.